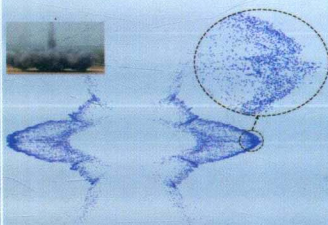
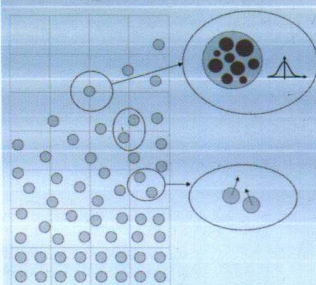


光滑离散颗粒流体动力学及与有限体积耦合方法 ——一种气体-颗粒两相流数值模拟新方法

强洪夫 陈福振 著



科学出版社

内容简介

光滑离散颗粒流体动力学 及与有限体积耦合方法

——一种气体-颗粒两相流数值
模拟新方法

强洪夫 陈福振 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

气体-颗粒(液滴、气泡或固体颗粒)两相流作为自然界和工业生产中很普遍的一种现象,广泛存在于航空航天、现代化工、能源、冶金、材料以及环保等各个领域,对该问题进行研究具有重要的科学价值和实际意义。本书是论述一种全新的求解气体-颗粒两相流动问题数值模拟方法的专著,包括基于颗粒动力学模型的SDPH方法的概念、SDPH-FVM耦合框架及其实现以及考虑颗粒蒸发、燃烧、聚合、破碎等过程的耦合新方法等。全书叙述力求简明扼要,重点突出。

本书适用于高等院校力学、工程热物理、航空航天、化工等专业高年级的本科生、研究生,以及相关专业的工程和科研人员使用。

图书在版编目(CIP)数据

光滑离散颗粒流体动力学及与有限体积耦合方法:一种气体-颗粒两相流数值模拟新方法/强洪夫,陈福振著. —北京:科学出版社,2019.3

ISBN 978-7-03-060016-5

I. ①光… II. ①强…②陈… III. ①颗粒-流体动力学-研究 IV. ①O351.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第294306号

责任编辑:宋无汗 张瑞涛/责任校对:郭瑞芝

责任印制:师艳茹/封面设计:陈敬

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京通州皇家印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019年3月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2019年3月第一次印刷 印张:15 1/4

字数:307 000

定价:120.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序

气体-颗粒两相流动作为两相流体动力学中的重要部分,在热能、化工、运输、水利、环保和医学等现代工程领域有着广泛的应用。对气体-颗粒两相流动系统进行研究涉及多尺度、物质转化、动量交换与能量传递等细节,属于包含数学、力学、物理学和系统学领域知识在内的跨学科、跨领域的复杂问题。鉴于气体-颗粒两相流动结构的复杂性、颗粒粒径分布的不均匀性以及实验设备的局限性等,单纯采用实验很难探究其全部流动特性。随着现代高速电子计算机的出现和快速发展,采用数值模拟仿真配合实验研究已成为多相流研究领域的主要趋势。

该书作者强洪夫教授及其团队以气体-颗粒两相流现象为研究背景,针对现有数值方法存在的不足,结合无网格数值方法领域多年研究积累的经验,提出了一种无网格粒子法与传统网格法耦合(SPH-FVM)的数值模拟方法,有效结合了两种数值方法的优势,取得了较好的数值仿真结果与仿真精度。同时,作者又成功地将新方法拓展至模拟颗粒的蒸发与燃烧以及液滴等软颗粒的聚合、破碎等复杂问题研究中,建立了新的模拟仿真方法体系,有效地解决了这一类问题。该书便是在此基础上,由近十年的研究成果收集整理而成,为多相流领域问题研究提供了一种全新的数值计算方法和工程仿真策略。

该书结构合理,内容新颖,系统完整,逻辑清晰。全书理论性、创新性较强,在计算流体力学理论最前沿开展技术、方法和理论探索,并积极与多相流学科最前沿的问题相结合,将新理论和新方法成功应用于复杂过程研究中,是一部典型的由工程应用到前沿理论方法研究,最后成功回归到工程实践的著作,同时又为其他领域同类型问题的研究提供了解决方案。

该书的出版对从事计算力学研究、应用和教学的科学工作者及相关工程技术人员都有重要的参考价值。

G.R. Liu

美国辛辛那提大学宇航工程与工程力学系教授

前 言

在航空航天动力系统中存在着大量的气体-颗粒(以下简称气-粒)两相流动现象。最典型的为固体推进剂铝颗粒的燃烧流动以及液体推进剂或航空燃油的雾化燃烧过程,该过程对于发动机的能量性能、绝热材料的烧蚀性能以及发动机燃烧稳定性具有重要的影响。同时,气-粒两相流还广泛存在于自然界、工业、农业、能源、制造以及环保等领域,典型的有自然界中风沙、冰雹、雨雪的运动,化学工业中的流化床,能源工程中煤的利用,石油、天然气的加工,装备制造中炼钢炼铁,水泥、化肥和各种粉末材料的生产过程以及高新技术中纳米材料的制备加工,微化工系统及生物代谢过程等均涉及气-粒两相流动。因此,针对气-粒两相流开展研究对指导工程实际具有广泛、深远的意义。

当前有关多相流数值模拟的书籍中,关于气-粒两相流数值方法主要有两种:颗粒轨道模型(又称离散颗粒模型)和颗粒拟流体模型(又称双流体模型)。然而,由于气-粒两相流系统具有多态性和复杂性,采用颗粒轨道模型和颗粒拟流体模型处理均会遇到一些问题。因此,阐述一种新的数值方法,解决现有模型在处理此类问题时遇到的困难,同时对新方法应用于各工程领域中的示范进行描述,将为读者提供一种新的思路。本书系统介绍了气-粒两相流概念及研究现状、气-粒两相流常用模型及方法和无网格 SPH 方法的基本理论等,为在多相流研究和计算流体力学方面零基础的读者提供一种循序渐进的学习过程,可有力地提升读者对于气-粒两相流问题的认知水平。

本书阐述了作者及研究团队提出的一种全新的求解气-粒两相流动问题的数值模拟方法——光滑离散颗粒流体动力学方法及与有限体积耦合方法,该方法克服了传统颗粒轨道模型求解遇到的运算复杂、计算量大、精度低、无法获取系统宏观特性的问题,克服了传统双流体模型遇到的无法追踪单颗粒运动轨迹、无法捕捉颗粒流动变形细节、不易加入颗粒蒸发燃烧模型等问题。对广泛存在于航空航天、现代化工、能源、冶金、材料以及环保等各领域中的气-粒两相流动问题进行数值模拟,真实再现颗粒碰撞、流动、蒸发、燃烧等细节过程,为揭示两相流动机理、改进装备设计、指导工业生产提供理论依据与技术支撑。

全书共 10 章,第 1 章主要阐述气-粒两相流动系统的概念、发展现状、SPH 研究现状及 SDPH 方法;第 2 章主要系统论述多相流求解常用模型及方法,使读者对气-粒两相流计算有深入的了解,同时对气-粒与气-液两相流计算模型和方法之间的差别有清晰的理解和认识;第 3 章主要论述 SPH 方法的基本思想及积分插

值理论,对本书新方法使用的边界施加模型及多相黏性流离散方法进行重点阐述;第4章阐述了基于颗粒动力学模型适于离散颗粒相求解的SDPH方法,通过推导SPH粒子属性与颗粒属性间的关系式,将传统SPH方法进行了改造,同时分析了该方法与传统SPH方法的差别;第5章论述了从基于颗粒动力学的双流体模型出发构建的SDPH与FVM间的耦合框架,并与其他现有的四种数值方法进行对比分析;第6章对含颗粒蒸发与燃烧模型的SDPH-FVM耦合方法进行了深入分析;第7章将气-液两相流这一特殊现象从气-粒两相流问题中剥离出来,专设章节进行SPH方法模拟求解的论述;第8章对基于颗粒间碰撞聚合及破碎理论,通过引入结晶动力学中的群体平衡模型,并基于矩方法求解策略所建立的考虑颗粒碰撞聚合、破碎和单颗粒破碎等过程在内的SDPH-FVM耦合新方法进行了详细阐述;第9章对第8章所述新方法在航天领域中的应用进行了详细分析和描述;第10章主要拓展新方法在武器研发、化工、灾害预防、物料输送等其他领域中的应用。

本书的撰写和出版得到了有关学者与专家的关心和帮助,在此表示衷心的感谢。同时感谢研究团队的其他成员——高巍然、刘虎、石超、范树佳、刘开、张林涛、郑华林、张国星、孙新亚、汪杜豆等给予的大力支持。另外,对本书涉及的相关国内外文献作者表示感谢。SDPH-FVM耦合方法作为一种新提出的方法,正在不断发展和完善中,仍有许多问题需要解决,希望本书能为多相流研究领域的科研和工程实践提供帮助,对SPH方法及其与传统方法的耦合方法的创新和新的应用领域的开拓起到促进作用。

特别感谢国家自然科学基金项目(51276192)对本书的资助。

由于作者水平有限,书中不妥之处在所难免,还望广大读者批评指正!

目 录

序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 气体-颗粒两相流动系统	1
1.1.1 多相流动和两相流动	1
1.1.2 气体-颗粒两相流动所涉及的领域	1
1.1.3 连续介质与离散颗粒	2
1.1.4 描述流动的两种基本方法	2
1.2 气体-颗粒两相流研究发展与现状	3
1.2.1 气体-颗粒两相流研究的历史发展	3
1.2.2 气体-颗粒两相流研究方法	4
1.3 光滑粒子流体动力学研究现状	10
1.3.1 SPH 方法的优势	11
1.3.2 SPH 方法研究进展	12
1.3.3 SPH 方法总结评述	15
1.4 SDPH-FVM 耦合方法提出的必然性	15
1.4.1 SDPH 方法	16
1.4.2 SDPH-FVM 耦合方法	16
1.5 本书内容安排	17
参考文献	18
第 2 章 多相流数值模拟常用模型及方法	28
2.1 双流体模型	28
2.1.1 模型概述	28
2.1.2 守恒方程	29
2.1.3 曳力模型	31
2.1.4 热传导模型	32
2.1.5 算例验证	33
2.2 混合模型	42
2.2.1 模型概述	42
2.2.2 守恒方程	42

2.2.3	相对速度和滑移速度	44
2.3	颗粒轨道模型	45
2.3.1	模型概述	45
2.3.2	颗粒轨道方程	45
2.3.3	连续相与颗粒相的相间耦合	46
2.3.4	算例验证	47
2.4	拟颗粒模型	51
2.4.1	模型概述	51
2.4.2	守恒方程	51
2.4.3	拟颗粒与颗粒间相互作用	52
2.5	流体体积函数模型	52
2.5.1	模型概述	52
2.5.2	守恒方程	53
2.5.3	界面追踪	54
2.5.4	算例验证	54
2.6	小结	57
	参考文献	58
第 3 章	SPH 方法基本理论	59
3.1	传统 SPH 理论	59
3.1.1	函数积分插值	59
3.1.2	粒子近似方法	60
3.2	邻近粒子搜索	61
3.3	SPH 方程积分求解	62
3.4	多相黏性流体的 SPH 离散方法	64
3.4.1	黏性项公式	64
3.4.2	多相流 SPH 方程及状态方程	65
3.4.3	人工应力方法	66
3.4.4	多相黏性流 SPH 方程	66
3.5	SPH 固壁边界施加模型	67
3.5.1	基于罚函数方法的固壁边界施加模型	67
3.5.2	基于虚粒子方法的固壁边界施加模型	71
3.6	小结	73
	参考文献	74
第 4 章	基于颗粒动力学模型的 SDPH 方法	76
4.1	颗粒动力学模型	76

4.1.1	颗粒数目密度分布	76
4.1.2	Boltzmann 积分微分方程组和一般输运理论	77
4.1.3	碰撞积分简化	78
4.1.4	颗粒相的质量、动量和能量守恒方程	80
4.2	用于离散相求解的 SDPH 方法	82
4.2.1	SDPH 方法的基本思想	82
4.2.2	SDPH 方法的基本方程	83
4.2.3	SDPH 方法与传统 SPH 方法的区别	84
4.3	超高速碰撞中的 SDPH 方法	85
4.3.1	适用于超高速碰撞问题的 SPH 方程组	86
4.3.2	弹丸和靶板的本构模型	86
4.4	算例验证	87
4.4.1	Couette 流算例验证	87
4.4.2	铝球超高速正碰撞铝薄板算例验证	90
4.4.3	Whipple 防护结构超高速碰撞算例验证	95
4.5	小结	97
	参考文献	98
第 5 章	SDPH-FVM 耦合框架及其实现	100
5.1	求解双流体模型的 SDPH 与 FVM 离散方法	100
5.1.1	颗粒相求解的 SDPH 方法	100
5.1.2	气体相求解的 FVM 方法	102
5.2	SDPH-FVM 耦合框架及算法流程	103
5.2.1	SDPH-FVM 耦合框架	103
5.2.2	SDPH-FVM 耦合算法流程	104
5.2.3	边界条件	106
5.3	一维分层颗粒沉降算例验证	107
5.4	小结	109
	参考文献	109
第 6 章	含颗粒蒸发、燃烧模型的 SDPH-FVM 耦合方法	110
6.1	颗粒蒸发模型	110
6.2	气相及颗粒相燃烧模型	112
6.3	气相爆轰模型	114
6.4	物质组分输运方程	114
6.5	含颗粒蒸发、燃烧模型的 SDPH-FVM 耦合方法流程	115
6.6	圆盘型颗粒团传热过程数值模拟	116

6.7	射流颗粒蒸发过程数值模拟	119
6.8	炸药爆轰驱动颗粒运动过程数值模拟	123
6.9	小结	125
	参考文献	126
第 7 章	求解气体-液滴两相流动过程 SPH 方法	127
7.1	基于连续表面力模型的表面张力算法	128
7.1.1	CSF 模型	128
7.1.2	CSPM 修正的表面张力算法	128
7.2	含壁面附着力模型的表面张力算法	131
7.3	气-液大密度差两相流 SPH 方法	132
7.3.1	气液两相 SPH 离散方程	133
7.3.2	人工黏性	134
7.3.3	人工应力	135
7.3.4	气液两相 SPH 方程组	136
7.4	气相场中二元液滴碰撞过程数值模拟	136
7.4.1	空气中二元液滴正碰数值模拟	137
7.4.2	空气中二元液滴斜碰数值模拟	140
7.4.3	多个碰撞条件下的二元液滴碰撞数值模拟	144
7.5	液滴在气相场中二次破碎过程数值模拟	145
7.6	液滴在气固交界面变形移动过程数值模拟	147
7.6.1	剪切气流驱动液滴在固体表面变形运动二维数值模拟	147
7.6.2	剪切气流驱动液滴在固体表面变形运动三维数值模拟	152
7.7	小结	155
	参考文献	155
第 8 章	含颗粒碰撞聚合、破碎过程的 SDPH-FVM 耦合方法	158
8.1	液滴碰撞理论	158
8.2	液滴二次破碎理论	160
8.3	描述颗粒碰撞聚合、破碎的群体平衡模型	161
8.4	含颗粒碰撞聚合、破碎过程的 SDPH-FVM 耦合方法流程	165
8.5	气化流化床颗粒尺寸分布数值模拟	168
8.6	小结	173
	参考文献	174
第 9 章	SDPH-FVM 耦合方法在航天领域中的应用	175
9.1	固体火箭发动机喷管内气-粒两相流数值模拟	175
9.2	过载条件下发动机燃烧室内气-粒两相流数值模拟	179

9.3 大型固体火箭发动机内颗粒燃烧流动数值模拟	182
9.4 剪切气流驱液液滴流动、蒸发过程数值模拟	189
9.5 小结	193
参考文献	194
第 10 章 SDPH-FVM 耦合方法在其他领域中的应用	196
10.1 SDPH-FVM 耦合方法在武器研发领域中的应用	196
10.1.1 燃料空气炸药爆炸抛撒成雾过程数值模拟	196
10.1.2 云雾团燃烧爆炸过程数值模拟	202
10.2 SDPH-FVM 耦合方法在化工领域中的应用	205
10.2.1 喷动流化床过程数值模拟	205
10.2.2 鼓泡流化床过程数值模拟	211
10.3 SDPH-FVM 耦合方法在灾害预防领域中的应用	218
10.3.1 沙粒起跳反弹过程数值模拟	218
10.3.2 自由来流下风沙跃移过程数值模拟	221
10.3.3 沙丘迁移过程数值模拟	224
10.4 SDPH-FVM 耦合方法在物料输运领域中的应用	226
10.4.1 垂直管内颗粒的气力输送过程	226
10.4.2 水平管内颗粒的气力输送过程	229
10.5 小结	231
参考文献	232

第1章 绪 论

1.1 气体-颗粒两相流动系统

1.1.1 多相流动和两相流动

按照理解角度的不同,可以将多相流按两种不同的方式进行划分:一种从物质形态上进行相的划分,另一种则从动力学意义上进行区分。从物质形态上看,自然界中的物质通常有三种状态:气体、液体和固体。因此除单相流动以外,流动还存在气-液、气-固、液-固构成的两相流动和气-液-固构成的多相流动。除此之外,还存在动力学意义上的相。例如,两种互不相溶的液体构成的流动,由于两种液体物性的不同,将不可避免地造成流动在动力学上的差异,因此互不相溶的液-液混合物的流动也属于两相流动。又例如,气流中携带大量固体颗粒构成的流动,由于固体颗粒通常存在粒径上的差异,不同粒径的颗粒显然具有不同的动力学性质。为了能够精确地研究不同粒径颗粒的流动特性,可将颗粒按不同粒径范围进行分组,采用不同的动力学方程加以描述,这样从固体颗粒中又分出了多个相,称为多相系统的流动。本书所研究的气-粒两相流动即从动力学意义上进行区分,这里的颗粒既可以指固体颗粒(从物质形态上可称为气-固两相流),又可以指液体颗粒如液滴(从物质形态上可称为气-液两相流),也可以指气体颗粒如气泡(从物质形态上也称为气-液两相流)。但本书所述的颗粒粒径分散性不大,为了减小问题的复杂性,在研究的过程中仅考虑颗粒的粒径分布,不对颗粒粒径造成的流动差异进行考虑,将所有颗粒采用相同动力学方程加以描述。气-粒两相流动是多相流动的一个简单特例。

1.1.2 气体-颗粒两相流动所涉及的领域

随着科学技术的发展,针对气-粒两相系统的研究领域不断扩大。在研究初期,人们对气-粒两相流的兴趣仅仅局限于接触最多的颗粒输送、气-液两相流动和泥沙运动等方面,而今天针对气-粒两相系统的研究已经扩展到从航空航天到动植物生理活动的广泛领域。目前气-粒两相流动系统研究涉及较多的领域包括以下几个。

(1) 宇航: 固体或液体燃料火箭、航空飞行器、空间生命保障系统、人造卫星运行、飞行器再入大气层、飞行器末端毁伤等。

(2) 能源: 常规电站锅炉、核反应堆、石油开采、地热电站、磁流体发电机、内燃机、喷流式冷却塔以及喷气式发动机等。

(3) 运输: 水煤浆的管道输送, 颗粒矿料、粮食谷物、棉花等物质的气流输送, 生产过程中颗粒材料的管内输送等。

(4) 化工: 精馏装置、反应器、流化床、乳化装置、喷雾器、洗涤塔、吸收装置、搅拌装置、除湿干燥装置等。

(5) 水利: 江河、湖泊中泥沙的沉积, 水库淤泥防治, 河口、港湾的泥沙运动等。

(6) 环境: 空气污染控制、防尘装置、PM_{2.5} 预防和治理、垃圾处理、空调制冷装置等。

(7) 地理: 土地的风蚀与沙土沉降、沙漠迁移、沙丘形成、泥石流、山体滑坡、雨滴的运动、江河与海洋的浮冰等。

(8) 生物: 细胞的运动、血液的流动、汗腺控制体温等。

1.1.3 连续介质与离散颗粒

在对气-粒两相流建立数学模型进行求解时, 必须建立连续介质与离散颗粒的概念。同时各相采用何种概念进行建模, 直接决定了相关数值方法的选择。连续介质作为流体力学和固体力学研究的基本假设之一, 它认为流体或固体质点在空间连续且无间隙地分布。质点具有宏观物理量属性, 如质量、压强、速度、温度等。这些属性都是空间和时间的连续函数, 满足一定的物理定律, 如质量守恒定律、牛顿运动定律、能量守恒定律、热力学定律等。质点是流体或固体保持宏观特性的最小体积单元。众所周知, 离散的颗粒间存在间隙, 当所研究的颗粒涉及的尺寸小于流体质点尺寸时, 连续介质概念不再有效, 这类问题不属于普通流体力学或固体力学的研究范畴, 其流动变形机理需要根据颗粒动力学理论进行研究。

对于气-粒两相流动而言, 在对气相建立方程时, 若扣除控制体内颗粒所占有的体积份额后, 连续介质的概念仍然适用。对气体中携带的大量颗粒, 颗粒间的间距要比分子间距大得多, 在研究颗粒相时, 是否仍将其看成是连续介质, 需要根据颗粒的粒径、所研究流场的空间范围相对尺寸、颗粒的浓度与颗粒浓度分布的均匀性以及研究所需要的精确程度等因素确定。将颗粒相作为不同的介质模型可以建立不同的数值方法, 目前用于求解气-粒两相流的颗粒轨道方法和欧拉-欧拉方法分别属于将颗粒相看成离散颗粒和连续介质时所建立的方法。

1.1.4 描述流动的两基本方法

在流体力学中, 描述流体的流动有两种基本的方法: 拉格朗日方法和欧拉方法。对于气-粒两相流中流场的描述仍然如此, 根据气-粒两相流动的特征和描述

准确性的需要,可同时运用欧拉方法和拉格朗日方法分别对气相和颗粒相进行描述。目前,对于气-粒两相流的研究主要有三类不同的耦合方法:欧拉-欧拉方法、欧拉-拉格朗日方法以及拉格朗日-拉格朗日方法(具体方法的研究现状在 1.2 节进行详细介绍)。准确理解欧拉方法和拉格朗日方法对于气-粒两相流的研究相比单相流体研究更为重要。

1. 描述流体运动的欧拉方法

欧拉方法着眼于空间,以流场中每一空间位置为描述对象,描述这些位置上流体的物理属性随时间的变化。采用欧拉方法需要对所研究的流场建立空间坐标系。在直角坐标系中,流场中任一点 (x, y, z) 处,物理参数 B 随时间 t 的变化关系表示为

$$B = B(x, y, z, t) \quad (1.1)$$

采用欧拉方法时,给定流场中任一空间位置,便可以得到这一空间位置处流体的运动状态和流体的物理参数。

2. 描述流体运动的拉格朗日方法

拉格朗日方法着眼于流体质点,以流场中每一流体质点为描述对象,描述这些质点的位置、速度及物理量随时间的变化。若以 (a, b, c) 表示质点在某一时刻 t 所处的位置,则不论该质点在其他时刻已经运动到何位置以及物理参数经历了何种变化,该质点的任一物理量 B 对于时间的变化可以表示为

$$B = B(a, b, c, t) \quad (1.2)$$

采用拉格朗日方法,给定任意流体质点,便可得到该流体质点在 t 时刻所处的空间位置和它的运动状态等物理参数。同时,由于拉格朗日方法通过追踪每一流体质点来描述流场的变化,因此,采用拉格朗日方法可以得到流场中所有流体质点的运动轨迹。

1.2 气体-颗粒两相流研究发展与现状

1.2.1 气体-颗粒两相流研究的历史发展

对于两相流的研究,在 19 世纪就产生了有关明渠水流中泥沙的沉降和运输的论述,但对于两相流系统的研究从 20 世纪 40 年代才开始。在 40~50 年代,研究两相流的学者还较少,且对于两相流研究主要集中于实验观测和现象描述两方面。从 60 年代开始,两相流才逐渐受到越来越多学者的关注,但研究内容仍为一些简单的两相流动实验测试及基本模型的建立和研究^[1,2]。在这期间,Davidson 和

Harrison^[3] 在流化床研究领域, 基于两相的概念提出了著名的气泡模型, 对两相流研究发展产生了巨大的推动作用。在 20 世纪 70 年代, 学者开始对一些相对复杂的多相流现象进行实验测试, 并在流体力学、传热学等理论的基础上, 发展建立了多相流理论体系^[4-6]。80 年代, 对多相流的研究开始从相对简单的管道流动逐渐发展到相对复杂的流化床流动和气-粒两相分离运动, 从稀相流动发展到密相流动, 并在稀相流动研究的基础上, 建立了密相流的物理模型和基本方程^[7-9], 并且逐渐开始应用于固体火箭发动机^[10] 及其他领域气-粒两相流的研究。在此期间建立的颗粒动力学模型^[8] 成为后来用于数值模拟的重要理论依据。90 年代之后, 多相流研究更为活跃, 研究内容从无源流场向有源流场发展, 刻画尺度从宏观特性向微观结构深入, 研究空间由一维、二维向三维发展, 许多学者建立了各种物理及数学模型, 使多相流理论体系飞速发展和完善。经过半个多世纪的发展, 目前气-粒两相流的稀相流动可以通过建立数学模型、借助计算机计算得到较为满意的结果。但对于高浓度气-粒悬浮系统来说, 由于颗粒间相互作用和气-粒间耦合关系的复杂性, 以及计算量的限制, 涉及浓相气-粒两相流的工程设计仍主要通过实验进行。

总之, 气-粒两相流至今发展还很不成熟, 尚属于发展初期阶段, 亟需更多的研究人员开展与气-粒两相流动相关的研究工作。

1.2.2 气体-颗粒两相流研究方法

气-粒两相流动已在大量的工业工程中得到了广泛的应用, 如航空航天、化工、冶金、能源等领域。如上小节回顾的气-粒两相流研究历史, 研究人员对气-粒两相流动过程进行了大量的实验和模型化研究。但不论是采用测量颗粒浓度的电容法和同位素法, 还是测量气体和颗粒两相的速度、湍流度和浓度的多普勒法、粒子速度测速法和全息法, 都很难了解气-粒两相流动的全部特性, 并且消耗大量的人力物力。同时, 由于气-粒两相流动过程的复杂性, 大部分理论研究基于经验或半经验模型, 如上小节提到的气泡模型以及描述提升管内两相流动的环核模型、絮状物模型等。这些模型虽然在一定程度上丰富了对气-粒两相流动系统的认识, 可以描述一些实验现象, 但其预测能力有限, 无法给出详细的流场信息。

随着计算机的快速发展, 计算流体力学 (computational fluid dynamics, CFD) 逐渐成为多相流研究的主要工具。其基于流场中质量、动量和能量守恒定律, 建立反映气-粒两相流动的基本流体力学方程组, 进而采用相应的数值计算方法离散求解, 得到对整个流动过程的详细描述。根据对连续相和离散相的处理不同, 气-粒两相流的数值方法主要有三种: 欧拉-欧拉双流体模型、欧拉-颗粒轨道模型和拉格朗日-拉格朗日拟颗粒模型。本书所阐述的用于求解气-粒两相流动的新方法属于另一种新的数值方法, 因此这里重点对现有的三种数值方法进行归纳总结, 便于对

比分析和研究。

1. 欧拉-欧拉双流体模型

双流体模型 (two fluid model, TFM), 又称为颗粒相拟流体模型, 最早由 Anderson 和 Jackson^[11], Soo^[12], Garg 和 Pritchett^[13] 等提出并发展而来。该模型在求解多尺度气-粒两相流方面发挥着重要的作用。该模型理论上将每一相都看成是充满整个流场的连续介质, 其中颗粒相是和气体相相互渗透的拟流体, 与气体相相同, 均在欧拉坐标系下采用基于宏观连续介质原理的质量、动量和能量守恒方程进行求解。此类模型中, 空间中的每一点均为各相所共有, 两相间存在着相互作用。TFM 的基本假设为: ①流场中每一相具有各自的速度、温度和体积分数, 按尺寸分成的各组颗粒内部具有相同的速度和温度; ②颗粒相在空间中的速度、温度和体积分数分布函数连续; ③采用初始尺寸分布区分颗粒组; ④每一颗粒相不仅与连续相具有质量、动量和能量的交换, 其自身还具有湍流脉动, 造成颗粒的质量、动量和能量的湍流运输, 颗粒的脉动与自身的对流、扩散及与气相的相互作用相关; ⑤对于稠密颗粒拟流体, 颗粒间的碰撞还会造成颗粒黏性、扩散和热传导等现象的发生。

TFM 中颗粒相方程组与气体相方程组具有相同的形式, 给计算求解带来了方便, 且可以处理任何浓度的颗粒流动。该模型中, 气相方程通过气体压力、黏度等本构关系进行封闭, 对于同样基于连续介质假设的颗粒相也可采用相似的处理方法, 通过引入固体体积黏度、剪切黏度和压力等概念, 建立其本构关系计算式, 从而对颗粒相方程进行封闭。同时, 还需考虑气-粒两相间相互作用, 曳力计算模型为该问题提供了解决途径。

最早对于颗粒相黏度的处理采用常黏度模型进行计算, 即将颗粒相黏度设置为常数。Gidaspow^[14] 采用常数为零的无黏度模型, 成功模拟了鼓泡流化床的流态化。Tsuo 和 Gidaspow^[15] 通过定义颗粒相黏度为气相黏度的 100 ~ 200 倍, 模拟了低速床和提升管中气-粒运动, 得到在用于垂直管瞬态二维流动的模拟时常黏度模型能够预测稀相和稠密相的流型。常黏度模型虽然可在一些算例中预测流化床内的流动, 但其定量能力不确定。

由于颗粒相黏度由颗粒间碰撞和湍流行为产生, 反应颗粒相能量的耗散特性, 为颗粒浓度和颗粒物性等参数的函数, 因此依据该结论及实验数据和经验参数, 可得到一系列颗粒相黏度经验模型。Enwald 等^[16] 对该模型进行了分析研究, 得出混合物黏度在颗粒相浓度较高时有数量级的差别, 同时混合物黏度还包含颗粒边界层引起的近邻效应影响, 反推得到固相黏度受特定条件限制。可以看出, 常黏度模型及经验模型对颗粒相黏度的处理不能从机理上解释多相流的许多重要现象。

类比于分子运动理论^[17], 将颗粒相描述为无间隙的拟流体, 建立起了颗粒动

力学理论 (kinetic theory of granular flow, KTGF)^[8,18], 为求解颗粒相黏度提供了一种理论方法。通过 KTGF 推导, 可以明确颗粒黏度的具体物理意义, 并可写出完整的碰撞黏度、动力黏度和体积黏度表达式^[19]。自从 Sinclair 和 Jackson^[20] 等首先应用颗粒动力学理论模拟流化床中的气固两相流动以来, 许多研究者从不同的角度对 KTGF 进行了修正并应用于更广的领域。该模型中引入颗粒拟温度来描述颗粒间的速度脉动, 颗粒相黏度以及应力均为颗粒拟温度的函数。由此建立起来的 TFM 作为一种多相流模型逐渐引入商业软件中, 并成功进行了鼓泡流化床^[21-24]、喷动流化床^[25-28]、循环流化床及其他气-粒两相流过程^[33-36] 的模拟。另外, Gidaspow 等^[14,19] 将拟流体模型推广到流化床内壁面与床层之间传热特性的数值模拟中。在此基础上, Kuipers 等^[33] 采用气相导热系数对固定床层有效导热系数进行了计算。Schmidt 和 Renz^[37] 利用该方法模拟了流化床层与床内埋管表面之间的传热过程。Chang 等^[38] 将不同颗粒间的碰撞传热模型引入 TFM 中, 模拟了稠密气固两相流中的热传导过程。Enwald 等^[16] 对 TFM 在流态化领域的应用进行了全面的总结。周芳等^[39] 采用基于 KTGF 的 TFM 对二维风沙气固两相流进行了数值模拟。武生智等^[40] 同样运用该模型对摩阻风速和颗粒粒径对风沙流场的影响进行数值研究。周晓斯等^[41] 采用大涡模拟耦合颗粒相湍流拟流体模型对近床面风沙流动过程进行了三维数值计算。

尽管近些年来采用 TFM 对各领域中的流态化过程数值模拟取得了很大成功, 但该模型仍存在着一些难以解决的问题, 主要包括以下几种。

(1) 无法进行微观层次上的研究。拟流体模型是从连续的观点来处理问题且采用基于欧拉网格的数值方法进行求解, 因此所得计算结果仅能反映多个离散颗粒在局部区域内的平均特性, 获取不同时刻颗粒在固定空间位置上的分布特性, 而无法追踪颗粒的运动轨迹, 无法捕捉颗粒运动细节, 无法获得在颗粒层次上的具体信息。

(2) 易产生伪扩散。采用 TFM 进行求解, 不仅对于气体相采用网格法进行离散求解, 同样对于颗粒相采用网格数值方法, 而在实际数值模拟时, 当流动方向与网格线成一倾斜角, 并在与流动垂直的方向上存在非零的因变量梯度时, 网格法离散格式都会产生伪扩散。这种两相同时产生伪扩散的结果, 将对数值模拟产生严重影响。

(3) 不易加入颗粒蒸发、燃烧等物理化学模型。颗粒的蒸发、燃烧涉及流场中单颗粒或特定颗粒的变化过程, 相应颗粒的粒径将同时发生改变, 从而影响颗粒的运动及相间能量交换特性。而在 TFM 中, 采用欧拉网格法求解颗粒相, 任何参量的变化必须通过建立相应的输运方程求解得到, 而对于特定颗粒发生的蒸发和燃烧过程来说, 建立该模型方程存在一定的难度, 目前还未见相关报道, 同时也不直观, 偏离了颗粒相求解的本质。

这些不足制约了 TFM 在某些领域的发展, 亟待新的数值方法汲取该模型的优